

RI계기를 이용한 성토시공 관리기법 연구(I)

—RI계기의 검증실험 및 교정식 작성—

A Study on Embankment Compaction Control System using RI Gauge (I)

—Focuses on the Inspection and Calibration of
Radio-Isotope Density/Moisture Gauges—

구본효* · 나경준* · 이진후* · 홍성완*

Koo, Bon Hyo · Na, Kyung Joon · Lee, Jin Hoo · Hong, Sung Wan

Abstract

The laboratory methods for compaction of soil (KSF 2312) and for moisture of soil (KSF 2306) in combination with the soil density in place by the sand-cone method (KSF 2311) are generally used for compaction control of soils. However, these methods have limitations in number of test and in accuracy. In addition, they are time-consuming. Therefore, they are not adequate for speedy control of embankment compaction in a project with huge amount of earthwork. The RI (Radioisotope) gauges for measurement of soil density and/or of soil moisture are widely used for the compaction control of soils in many countries. But in Korea, they have had a limited usage and available informations for uses of RI gauges are insufficient. Therefore, this study promotes efficient and safe use of RI gauges in geotechnical engineering. In this paper, fundamental aspects such as the principles of RI gauges, gauge inspection techniques and the applicability and limitations of RI gauges for field usage were reviewed. And a new calibration curves suitable for the Korean soils were suggested.

요 지

현재 국내에서 사용중인 흙의 다짐관리 방법에는 실험실내에서 시행하는 흙의 다짐 시험(KSF 2312)과 함수량시험(KSF 2306), 현장에서 모래치환법에 의한 흙의 단위중량 시험 방법(KSF 2311)이 있다. 이러한 시험방법들은 소요시간이 길고 작업이 번잡하므로 최근과 같이 빠른 시공속도가 요구되는 대규모 토공 관리에는 부적합하며 측정자의 개인오차 등으로 인한 신뢰성도 낮다. 최근 대부분의 외국에서는 방사성 동위원소(RI)를 이용한 흙의 밀도/함수량 측정계기를 성토시공관리에 이용하고 있으나 국내에서는 이에 대한 기초연구의 부족 등의 이유로 건설분야에서의 RI계기 이용이 제한되어 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내 토질 기술자들에게 RI계기를 소개하고 RI계기를 보다 효율적이고 안전하게 사용할 수 있도록 RI계기에 대한 기초연구를 실시하였다. 이를 위해 우선적으로 RI계기의 검증연구와 현장 적용성에 대한 검토를 실시한 후, 국내 토질에 적합한 교정식을 도출하였다.

* 정회원 · 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원

1. 서 론

최근 고속도로, 고속전철, 신공항 등 대규모 토공을 포함하는 토목공사가 계획 또는 시행됨에 따라 신속하고 효율적인 성토다짐관리기법의 필요성이 대두되고 있다. 현재 국내에서 사용되는 흙의 다짐관리 방법으로는 실내에서 시행하는 흙의 다짐시험(KSF 2312)과 흙의 함수량시험(KSF 2306) 및 현장에서 모래치환법에 의한 흙의 단위중량 시험방법(KSF 2311)을 들 수 있는데 이러한 시험방법은 시험실시에서부터 결과를 얻기까지 상당한 시간이 소요될 뿐만 아니라 측정자의 개인오차 등으로 인하여 그 신뢰성에 한계가 있어 효율적인 다짐관리가 어렵다.⁽¹⁾

일찌기 미국, 일본 등 선진외국에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 방사성 동위원소를 이용한 밀도/함수량 측정기(RI계기)를 개발하였고 최근들어 세계 각국이 폭넓게 사용하고 있는 실정이다. 국내에서도 이러한 장점 때문에 RI계기 활용에 대한 한시적인 연구가 있었으며, 1989년 제정된 건설기술관리법 감리회사 설립등록 기준에 RI계기 구비가 의무화 되었기 때문에 국내의 여러 감리회사에서 RI계기를 구비하였으나 RI계기의 사용, 이동 및 보관에 따른 법적규제와 함께 방사성 계기에 대한 인식부족 등으로 인하여 지속적인 활용이 이루어지지 않았다. 그러나 최근들어 방사선 규제법의 제약을 받지 않고 사용할 수 있는 100 μ Ci(마이크로 큐리) 이하의 밀봉선원을 가진 RI계기의 개발, 보급으로 이러한 사용상의 제약이 완화되었고 국내에 기 도입된 RI계기의 활용 및 시공성 향상 차원에서 불태이에 대한 활용연구가 필요하다.⁽²⁾

본 연구에서는 RI계기를 국내 지반기술자들에게 소개하고, RI계기의 기초연구인 RI계기의 검증연구, 현장적용성 연구를 수행하고 국내에서의 효율적인 사용을 위해 새로운 교정식을 작성 제시하였다.

2. RI계기의 특성

2.1 RI계기 일반

지반공학에 이용되는 RI계기는 방사성 동위원소를 이용하여 흙의 물성값을 측정하는 장치로서, 흙의 밀도를 측정하는 밀도계와 흡수에 포함되어 있는

수분량을 측정하는 수분계로 그 공학적기능을 설명할 수 있으며, 1950년 초반 Belcher 등에⁽⁴⁾ 의해 미국에서 처음 개발된 이래 도로, 공항 및 댐의 건설공사에서 성토다짐 관리에 사용되어 왔다. 기능에 따라 밀도만을 측정하는 밀도측정계나 수분만을 측정하는 수분측정계로 각각 사용되기도 하지만 최근에는 이들 두가지 기능을 모아서 밀도와 수분량을 함께 측정할 수 있는 계기가 많이 사용되고 있다. 또한 이들 RI계기에 소형 컴퓨터를 내장시켜 측정 결과를 습윤밀도, 건조밀도, 함수비, 포화도, 간극비 및 다짐도 등 현장관리에 필요한 관리지표로의 즉각적인 치환과 함께 현장 판독이 가능하며 인쇄하여 보관할 수 있는 기능까지 갖추고 있다.

2.2 RI계기의 측정원리

밀도측정기의 원리는 광자로 이루어진 방사선이 물질을 투과할 때 물질에 흡수되어 손실되는 비율이 물질의 밀도와 일정한 관계가 있다는 점을 이용한 것이다.

즉 조밀한 상태의 흙에서는 흡수량이 많고 투과량이 적은 반면 느슨한 상태의 흙에서는 흡수량이 적고 투과량이 많아진다는 원리이다. 보통 1.4~2.7 t/m³의 범위에 있는 흙의 밀도를 측정하려면 대략 350~1000 keV의 에너지를 발생시킬 수 있는 선을 방출하는 동위원소가 필요하게 되며 Cesium-137, Radium-226, Cobalt-60 등의 방사성 동위원소가 주로 사용된다.^(5,6)

수분 측정기의 원리는 중성자를 방출하는 선원을 통하여 방출된 높은 에너지를 갖고 있는 고속중성자가 물질 중에 존재하는 수소원자에 충돌하게 되면 낮은 에너지 상태의 열중성자로 바뀌게 되는 성질을 이용한 것이다. 흙 중의 수소이온은 물(H₂O)의 형태로 존재하기 때문에 중성자선을 투과시킨 흙속에서 열중성자가 생성방출되는 비율을 측정하면 흙의 수분량 측정이 가능하게 된다. 수분량 측정에는 0.4~10 MeV의 에너지를 가진 중성자를 방출할 수 있는 동위원소가 필요한데, 보통 Beryllium Target이 내장된 Americium-241 이나 Californium-252 가 사용된다.⁽⁵⁾

2.3 RI계기의 분류

지반공학에서 사용되는 RI계기는 주로 지반내

물리탐사에 이용되는 공내측정형(Depth Type)과 다짐관리에 이용되는 표면측정형(Surface type)의 두종류로 구분되며 방사선의 전달 및 측정방법에 따라 직접전달법(Direct transmission method)과 후방산란법(Back scattering method)으로 나눌 수 있다.

직접전달법은 선원봉에서 방출된 방사선이 직접적으로 검출부에 도달하는 과정에서 통과되는 흙 매질의 상태를 측정하게 되는 원리이며, 후방산란법은 선원봉에서 방출된 방사선이 흙 매질에 방출되어 무작위로 산란된 상태의 방사선을 검출부에서 측정하는 원리이다.

2.4 RI계기의 장단점

RI계기를 이용하여 흙의 밀도나 함수량을 측정하는 경우, 모래치환법이나 노건조법과 같은 재래식 시험법에 비하여 다음과 같은 장점이 있다.⁽²⁾

- 비파괴 시험의 특성을 가지기 때문에 한 장소에서 여러번 반복 측정이 가능하다.
- 측정에 소요되는 시간이 짧고 현장에서 곧바로 결과를 알 수 있다.
- 측정자의 개인 오차가 거의 들어가지 않는다.
- 취급이 간편하며 올바른 사용으로 높은 정도를 얻을 수 있다.
- 제한된 시간에 많은 측정데이터를 얻을 수 있어서 통계적 다짐관리가 가능하다.
- 시간변화에 따른 다짐도 변화추이 등의 측정이 가능하다.

하지만 이러한 많은 장점에도 불구하고 감마선이나 중성자선의 붕괴 현상이 등간격 시간에 동일한 양의 방사선 붕괴가 일정하게 일어나는 것은 아니기 때문에 통계적인 요동에 따른 오차가 미세하지만 포함되어 측정값에 영향을 미친다는 점과⁽⁶⁾ 동위원소의 취급에 각별히 주의해야 한다는 점 등의 단점이 있다.

3. RI계기의 검증실험

RI계기를 이용하여 흙의 밀도와 수분량을 측정하는 것은 선원에서 방출된 방사선이 흙이라는 매질을 통과하여 검출부에 도달하는 양을 카운트하여 분당 검출선수로 나타내는 것이며 단위는 CPM

(Count per minute)이다. 이렇게 카운트 되는 계수율은 선원에서 방출되는 방사선의 요동으로 인하여 같은 조건하에서 동일한 매질에 대한 밀도와 함수량을 측정하여도 카운트 되는 값이 꼭 일치하지 않는다. 따라서 RI계기 사용에 있어서는 RI계기의 기계적 특성이 어떠한 오차발생 가능성을 갖고 있는지에 대한 통계적판단과 실험을 통한 검증이 필요하다. 또한 측정되는 모든 값들이 기계적인 동작에만 의존하기 때문에 인간에 의해 발생할 수 있는 계기 조작상의 오차는 우선 고려치 않더라도, 측정치에 영향을 줄 수 있는 기타 영향인자에 대해서는 보정 등의 조치를 취할 필요가 있다. 따라서 본 검증 실험에서는 이러한 상황들을 파악하기 위하여 주어진 조건하에서 실험을 실시하여 RI계기 특성을 파악하였다.

3.1 검증실험용 RI계기

본 실험에서는 국내 방사선 규제법에 저촉을 받지 않는 100 μ Ci 이하의 밀봉선원을 가진 RI계기를 검증실험 대상으로 하기 위하여 일본 Fieldtech사에서 생산된 FT-102 RI계기(그림 1 참조)를 대상계기로 정하였다. 이 RI계기는 70 μ Ci의 Cobalt-60과 30 μ Ci의 Californium-252를 각각 밀도계와 수분계의 선원으로 사용하는 밀도/수분계 일체형 계기이며,

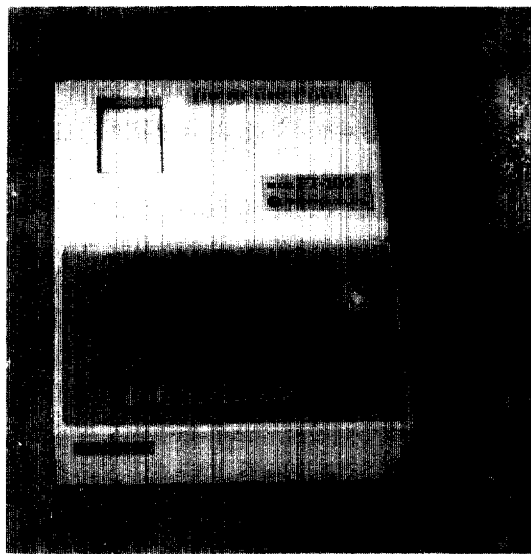


그림 1. FT-102 RI계기.

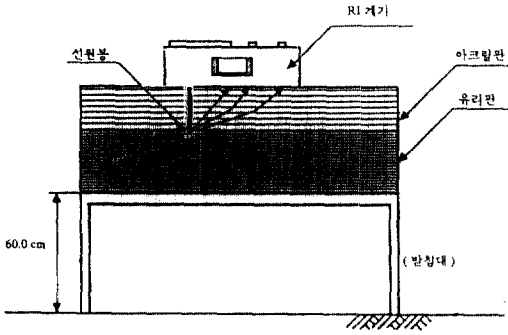


그림 2. 기준원기 모형도.

선원봉의 삽입 깊이가 20 cm로 고정된 표면측정용으로 측정방식은 직접전달형식이다. FT-102 RI계기의 습윤밀도 측정범위는 $1.00 \sim 2.50 \text{ g/cm}^3$ 이고 함수량의 측정범위는 $0.05 \sim 0.9 \text{ g/cm}^3$ 이다.^(5,7)

또한 본 실험에서는 RI계기의 영향범위 등에 대한 검증실험을 위하여 기준제품인 표준체 이외에도 유리판과 아크릴판을 사용한 기준원기를 자체 제작하여 실험에 이용하였다(그림 2 참조).

3.2 측정시간에 따른 오차

본 절에서는 RI계기에 필연적으로 포함된 통계적인 요동이 측정치에 미치는 오차정도를 파악하기 위해 표준체에 대하여 측정시간과 측정 횟수를 반복 변화 시켜가면서 얻어진 측정치를 통계분석 하였다.

측정방법은 10분 동안 카운트하는 표준모드(Standard mode)에서 51회 연속측정한 결과와 1분 동안 카운트하는 현장모드(Field mode)에서 100회 연속측정한 결과를 통계분석 하였다. 측정결과는 표 1과 같다.

표 1에서 알 수 있듯이 평균값은 표준모드의 측정치와 현장모드의 측정치가 근사한 값을 보이지만 표준편차는 현장모드 측정이 표준모드 측정보다 3배 정도 크게 나타났다. 이는 표준체 모드에서는 10분간 측정된 값을 평균한 것이며 현장모드에서는 1분간 측정된 값이므로 장시간 동안 측정된 모드 상에서의 값이 더 정확하게 나타난 것으로 판단된다. 평균값을 최대값 또는 최소값과 비교해 보면 표준 모드에서는 밀도의 경우 약 0.5%, 수분량의 경우 약 1%의 차이가 나며 현장 모드에서는 밀도 2%, 수분량 3% 정도의 차이를 나타냈다.

표 1. 표준체에서 측정된 밀도 및 수분량 계수값

측정모드	표준모드(10분 측정)		현장모드(1분 측정)	
	밀 도	함수량	밀 도	함수량
최소값	16748	6383	16473	6269
최대값	16923	6515	17091	6657
평 균	16832.4	6446.8	16779.1	6450.3
표준편차	41.3	26.6	124.4	78.9

3.3 영향범위 검증

RI계기를 이용하여 현장밀도를 측정하는 경우, RI계기에서 얻어지는 밀도 및 수분량은 선원봉으로부터 방출된 방사선이 측정대상 매질을 통과하여 검출부에 도달할 때까지의 변화에 따라 그 값이 결정된다. 따라서 RI계기에서 방출된 방사선이 흙속에서 미치는 영향범위를 파악해 보면 1회의 RI측정이 대표할 수 있는 지반의 체적을 알 수 있다.

우선 평면방향의 영향범위 파악을 위하여 그림 3과 같은 $100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ 의 철제 몰드에 40 cm의 두께로 흙시료를 균질하게 다진 후 화살표 방향의 공시체 측면을 깎아 크기를 줄여가면서 RI 측정을 하여 선원봉으로부터 각 방향에 대한 영향범위를 파악 하였다.

공시체의 끝단부터 선원봉까지 거리별로 측정된 밀도 및 수분량의 영향범위 측정결과는 그림 4와 같다.

그림 4에 의하면 거리가 명백하지는 않으나 대체로 $L_1 = -6 \text{ cm}$, $L_2 = -3 \text{ cm}$, $L_3 = -5.5 \text{ cm}$ 이어서 선원봉으로부터 수평방향의 밀도 측정의 경우(범례에 D로 표시됨), 측정치가 균등해지는 영향범위는 L_1 방향에서는 0 cm, L_2 방향에서는 27 cm, L_3 방향에서는 10 cm로 각각 나타났으며 수분측정의 경우(범례에 M으로 표시됨)는 L_1 , L_2 , L_3 가 각각 11, -13, 1.5 cm여서 L_1 , L_2 , L_3 방향 모두 선원봉으로부터의 영향범위가 17 cm 정도로 나타났다.

한편, 깊이방향에 대한 영향범위 측정을 위해서는 그림 2와 같은 기준원기를 이용하였으며, 매질로서는 각각의 두께가 1 cm인 유리판과 아크릴판을 한장씩 겹쳐서 총 40장을 쌓아놓은 후 유리판과 아크릴판을 동시에 한장씩 건내어 두께를 줄여가면서 측정하였다. 측정결과, 그림 5와 같은 변화를 보였으며 따라서

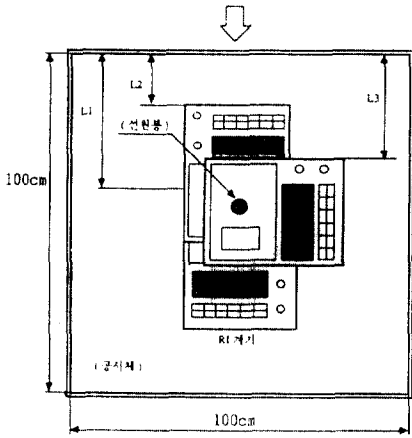


그림 3. RI계기의 영향범위 파악용 실험토조.

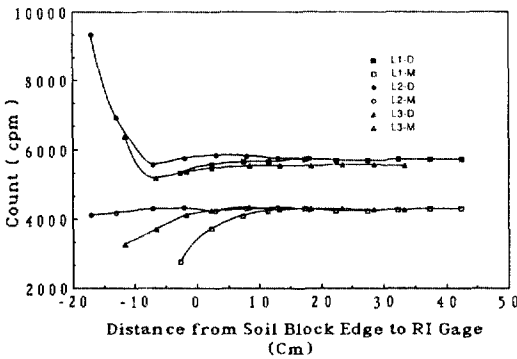


그림 4. 영향범위 측정결과.

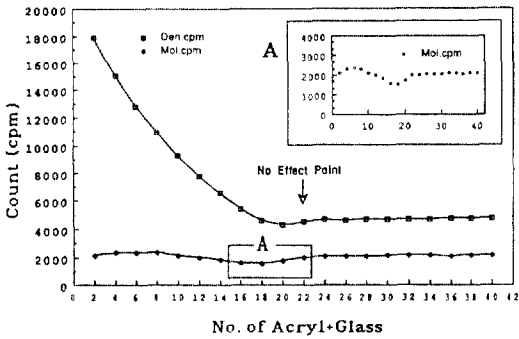


그림 5. RI계기의 깊이 영향범위 측정결과.

깊이방향으로 22 cm까지 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

3.4 주변 물체에 의한 영향

RI계기의 표준체 측정시 주변물체와의 이격거리에 따라 영향을 받지 않는 측정안전 거리를 파악하기

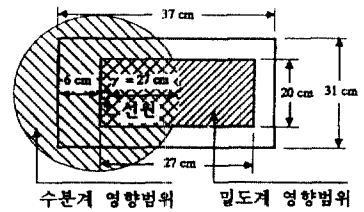
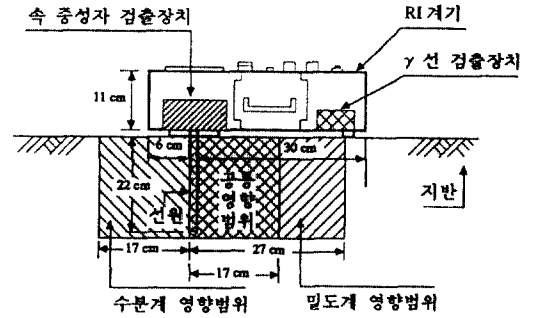


그림 6. RI계기의 영향범위.

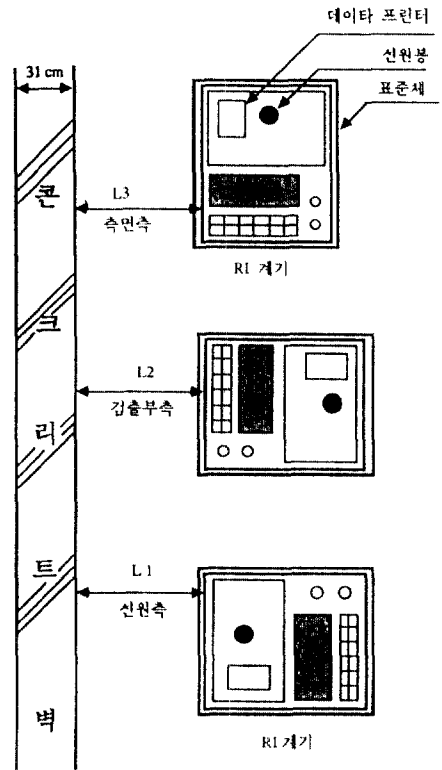
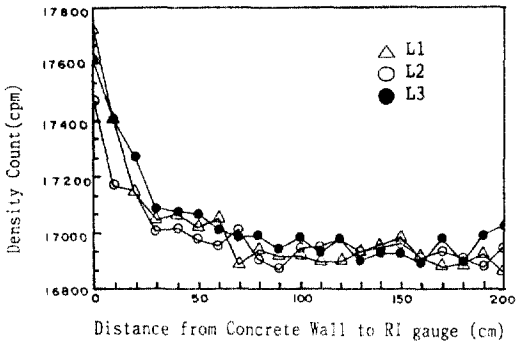
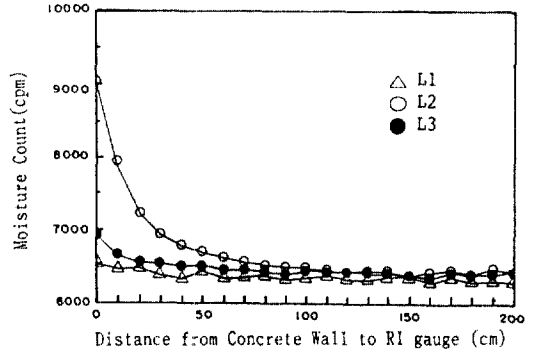


그림 7. RI계기의 콘크리트벽에 대한 이격위치.

위하여 그림 7과 같이 두께 31cm의 콘크리트 벽체와 RI계기가 설치된 표준체와의 거리를 변경시켜



(a)



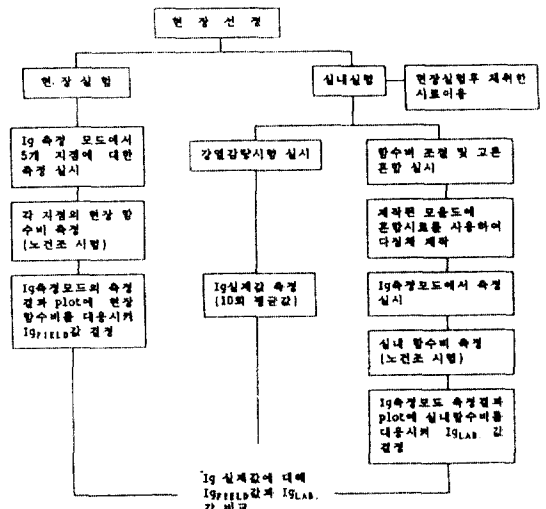
(b)

그림 8. 이격거리별 RI계기 측정치 변환.

가면서 밀도와 함수량 측정을 실시하였다. 측정방향은 선원봉과 검출부를 일직선으로 보았을 때 각 이격거리별로 계기를 90°씩 돌려 가며 세방향에서 측정을 실시하였으며 측정결과는 그림 8과 같다. 측정결과에 의하면 선원봉이 벽체쪽을 향한 경우가 선원봉과 벽체와의 거리가 가깝기 때문에 다른 경우보다 영향이 더 큰 것으로 나타났으며, 밀도 측정값은 수분량 측정치보다 먼 이격거리까지 영향을 미쳤으나 전반적으로 물체와 표준체의 이격거리는 1.5m 이상이 되면 거의 영향이 없는 것으로 판단되었다.

3.5 강열감량 보정

RI계기는 수소이온에 의하여 함수량을 측정하기 때문에 보통의 함수량측정에 포함되지 않는 흡착수나 유기물질속의 수소이온까지도 함수량으로 환산되므로 측정결과에 보정이 필요하다. 보통 보정계수를 입력시킨 후 내장된 교정식을 이용하여 보정된 값을 찾을 수 있도록 되어 있으며 보정계수는 대상시료에 대하여 노건조시험을 실시한 후 다시 강열감량시험을 시행하여 결정한다. 그러나 이러한 보정절차는 상당한 시간이 소요되므로 실제현장에서는 간단한 현장측정과 채취된 시료의 함수량 측정만으로 보정치(이하 Ig값으로 표기)를 결정할 수 있는 간편법을 이용하고 있으며^(5,8,9) 이를 위해 본 계기에는 Ig측정모드라는 채널이 따로 설정되어 있다. 여기서는 보정치를 변동시켜 가면서 계기에 나타난 함수량을 도표로 그리고 노건조를 통해 측정된 함수량에 대응하는 보정치를 도표에서 찾아 이를 Ig



시험결과

IgFIELD값	4.2, 4.3, 4.6, 4.8, 5.2 (5개소)
Ig 실제값	3.7
IgLAB 값	3.5

그림 9. Ig측정모드에서의 실험흐름도 및 결과.

값으로 결정한다.

Ig 측정모드 채널을 이용하여 현장에서 Ig값을 추정하였을 때와 실내에서 Ig 측정모드 채널을 이용하여 Ig값을 추정하는 경우에 실제 Ig값과의 차이를 알아보기 위하여 그림 9에 보인 과정에 따라 분석하였다.

즉 강열감량시험을 통하여 얻어진 Ig 실제값을 기준으로 Ig 현장값의 변화폭은

$$\frac{I_{gFIELD}}{I_{g실제값}} = \frac{4.2 \sim 5.2}{3.7} = 1.135 \sim 1.405 \text{이며}$$

Ig 실험실값의 변화폭은

$$\frac{I_{gLAB.}}{I_{g실제값}} = \frac{3.5}{3.7} = 0.946$$

이 된다. 따라서 현장에서 Ig모드로 측정된 결과는 Ig실제값보다 1.135~1.405배로 크게 나타났으나 실내에서 충분한 혼합과 재성형을 거친 실내Ig모드의 경우는 0.946배로 적게 나타나 현장Ig모드보다 Ig실제값에 더욱 근접하는 것을 알 수 있다. 이때 현장Ig모드를 이용하는 경우는 실제 이 오차로 인해 1~2% 정도의 함수비 오차를 발생 시킨다.

4. RI계기의 현장 적용성

여기서는 RI계기를 이용한 흙의 밀도/수분 측정법과 기존의 모래치환법을 측정효율성 및 1회 측정용적의 측면에서 상호 비교해 봄으로써 RI계기의 현장 적용성을 판단하였다.

4.1 모래치환법과 RI계기법의 측정효율성 비교

본 절에서는 모래치환법과 RI계기법의 각 작업 공종별 수행시간을 측정하여 효율성을 비교하였다. 검토방법은 우선 모래치환법과 RI계기법의 각 작업별 공종을 현장측정 기준으로 분리한 후 해당공종별 수행시간을 측정하였으며 이것들의 평균값을 취하여 공종별 수행시간으로 결정하였다. 시험은 국내 고속도로현장 4개소에서 실시하였고 총 시험개소는 모래치환법 80개소, RI계기법 120개소였으며 시험자는 모래치환법과 RI계기측정 모두에 능숙한 2인 1조의 시험가능자를 활용하였다.

작업공종별 측정된 평균 작업 수행시간은 다음 그림 10과 같다.

그림 10에서 알 수 있듯이 모래치환법의 경우는 노건조 함수량 측정에 보통 24시간이 소요되므로 현장의 다짐상태를 파악하는데 시험 후 하루가 지나야 한다는 점은 차치하더라도 1개소의 측정전체 공정에 17.5분이 소요되는데 반하여 RI계기의 경우는 1개소당 2분으로써 모래치환법 1개소 측정시간

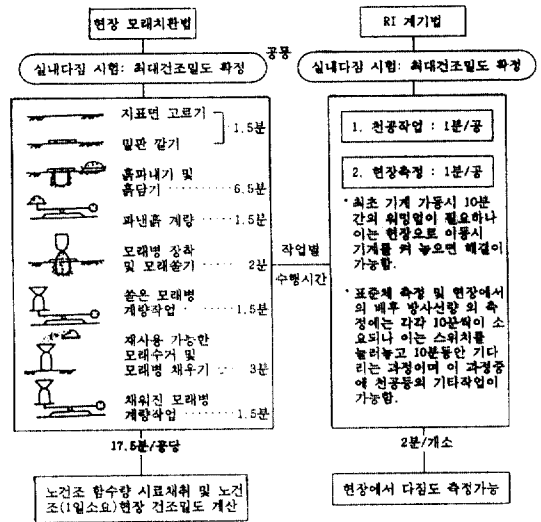


그림 10. 작업공종별 측정수행시간.

동안에 약 9개소의 RI측정이 가능하다. 이 외에도 모래치환법의 경우는 현장 기상조건에 따른 계량오차 및 측정시 조공재함유 정도에 따른 오차발생 가능성과 이에 따른 측정지연 가능성이 더욱 높아질 수 있다.

4.2 모래치환법과 RI법의 측정용적 비교

모래치환법과 RI계기법의 측정이 시험기준에 제시된 시험구간에 대하여 시험빈도를 고려하였을 때 어느정도의 용적비율 대표성을 갖는지 비교해 보았다.

모래치환법을 이용한 경우는 한국공업규격 KSF 2311에 그 시험방법이 규정되어 있으며,⁽¹¹⁾ 최대입경 100 mm 이내의 재료를 사용해야 하는 상부노상에 대해 이 규정을 적용하면 시험공의 체적은 요구되는 최소 체적인 2,800 cm³를 다소 상회시켜 3,000 cm³ 정도로 볼 수 있다.

RI계기를 이용하는 경우 RI계기에서 방출된 방사선이 흙속에서 미치는 영향범위를 파악해 보면 1회의 RI측정이 대표할 수 있는 지반의 체적을 알 수 있는데 이는 3.3절에서 이미 언급한 방법으로 측정된 결과 그림 6과 같고 모래치환법과의 비교는 표 2과 같다.

표 2. 모래치환법과 RI측정법과의 측정용적 비교

대상지반		최대입경 50 mm 이하인 노상토 지반		비고
시험법		모래치환법	RI계기법	
1회 측정시 대상지반의 밀도측정용적	값	약 3,000 cm ³	약 12,000 cm ³	RI계기법이 모래치환법보다 4배 정도 측정용적이 큼
	설명	1) KSF 2311에서 제시된 최소체적인 2,800 cm ³ 약간 상회시킴 2) 모래치환법에 사용되는 들밀도 시험기의 밀판구멍지름(16.2 cm)과 파내는 공의 깊이(15 cm)를 원주로 고려하여 계산한 경우 $16.22 \times \pi \times 1/4 \times 15 = 3,091.8 \text{ cm}^3$ $\approx 3,000 \text{ cm}^3$	선원봉으로부터 측정된 RI계기의 영향범위 L ₁ 방향 : 0 cm L ₂ 방향 : 27 cm L ₃ 방향 : 10 cm(좌, 우) 깊이방향 : 22 cm 따라서 $27 \times 20 \times 22 = 11,880 \text{ cm}^3$ $\approx 12,000 \text{ cm}^3$	
1회 측정시 대상지반의 수분량 측정용적	값	약 500 cm ³	약 20,000 cm ³	RI계기법이 모래치환법보다 40배 정도 측정용적이 큼
	설명	1) KSF 2311에서 함수량 측정용 시료의 최대 증량이 1,000 g으로 제시되어 있기 때문에 노상의 습윤밀도를 2.0 g/cm ³ 으로 본다면 약 500 cm ³ 의 체적이 수분량 측정에 소요됨	선원봉으로부터 측정된 RI계기의 영향범위 L ₁ 방향 : 17 cm L ₂ 방향 : 17 cm L ₃ 방향 : 17 cm 깊이방향 : 22 cm 따라서 $17 \times 17 \times \pi \times 22 = 19,974 \text{ cm}^3$ $\approx 20,000 \text{ cm}^3$	

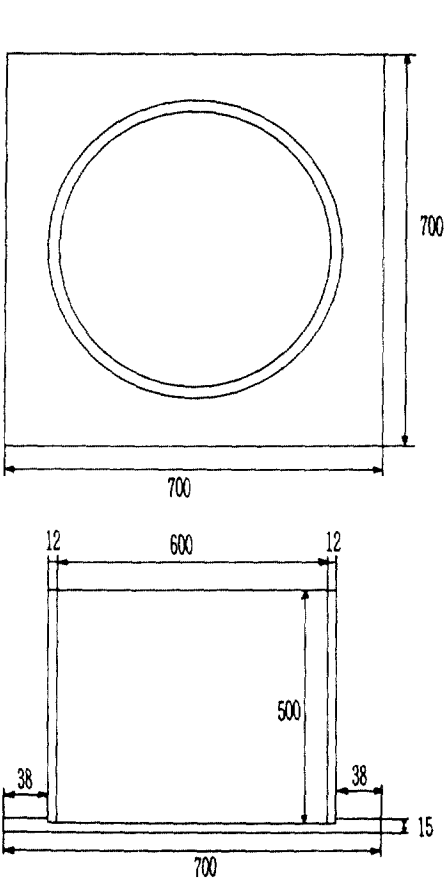
5. RI계기의 정확도 비교 및 교정식 작성

다짐관리에 이용되는 기존의 모래치환법과의 상호 비교연구를 통해 RI측정값의 모래치환법에 대한 정확도를 판단해 보려고 시도하였다. 즉 국내에서 노상토 재료로 이용되고 있는 여러종류의 대표적인 흙시료를 이용하여 일정한 밀도와 함수비를 갖도록 기준 공시체를 제작하고, 이에 대해 RI계기와 모래치환법을 이용하여 밀도와 함수비를 각각 측정 한 후, 측정값과 기준값을 서로 비교하여 두가지 방법에서 얻어진 측정값의 기준값에 대한 정확도를 판단하는 방법으로 RI계기의 정확성을 점검하였다. 또한 RI 측정값이 기준값에 보다 가깝게 될 수 있도록 RI

계기내에 내장된 교정식(변환식)을 수정 작성하므로써 국내 토질에 적합한 시험장비로 변환시키고자 하였다. 또한 실험시 밀도와 함수비의 절대 기준값을 나타낼 수 있는 표준 공시체의 제작을 위하여 기준 공시체 제작용 모울드와 다짐장비를 별도로 제작하여 사용하므로써 실험의 신뢰성을 높이고자 노력하였다.

5.1 다짐 모울드 및 다짐장치

본 실험에 사용된 다짐모울드는 직경 600 mm, 높이 500 mm, 두께 12 mm의 원형 철제 모울드(그림 11 참조)로 700 mm×700 mm×15 mm의 사각강판에 8개의 조립장치를 이용하여 고정시켰다.



바닥판과 상부링을 조립식으로 만든다.

(조립장치 : 8개)

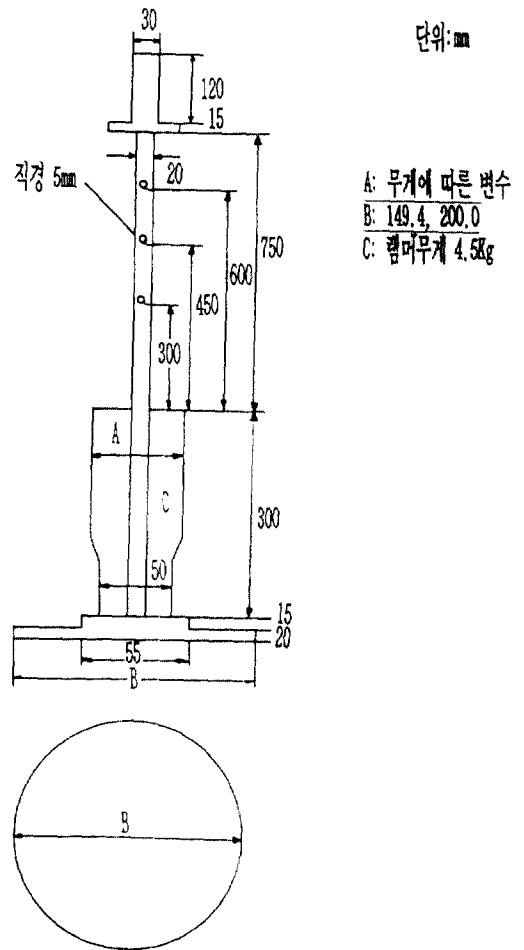
그림 11. 다짐 모듈드.

다짐장치는 그림 12와 같이 4.5 kg 무게를 가진 램머를 상부로 이동시킨 후 750 mm를 자유낙하시켜서 다짐판에 충격을 주는 램머낙하식 충격다짐장치이다.

5.2 실험시료 특성

실험시료는 실험계획 당시 노상다짐 작업을 하고 있던 우리나라 전역에 걸친 고속도로 건설현장 5개소와 국도건설현장 5개소에서 채취한 노상토 재료와 댐 코아용 재료 1개소의 총 11개소의 시료를 이용하였다.

실험시료에 대한 입도분석 및 물성치 시험 결과는 다음 표 3과 같다.



A: 무게에 따른 변수
B: 149.4, 200.0
C: 램머무게 4.5kg

그림 12. 램머낙하식 다짐장치.

5.3 기준공시체 제작 및 RI측정

본 실험에서는 기준공시체를 어느정도 완벽하게 만드느냐에 실험의 신뢰성이 좌우된다고 할 수 있다. 따라서 기준공시체 제작시 고른 수분 분포를 위한 흙의 배합과 균일성 유지를 위한 다짐 작업에 유의하였으며 기준밀도값의 계산에 이용될 공시체의 층별 높이 측정에 세심한 주의를 기울였다. 공시체 제작과정은 다음 그림 13의 흐름도에 보인 바와 같다.

5.4 기준값과의 비교

시험은 172개의 기준공시체를 제작하고 각 공시체에 대하여 RI측정과 모래치환법을 각각 적용하여 측정을 실시하였다. 데이터의 정리와 비교는 쉬운

표 3. 실험시료 특성

본 보고서 에서의 표기 (약 호)	채취 장소 (공사 명)	동일 분류	도립자 비 중	최대진조 밀도 γ_{dmax}	최적 함수비	입도 분포 (%)						소성도			강렬 감량 값 (g)
						4.76 mm 이상	4.76~ 2.0 mm	2.0~ 0.42 mm	0.42~ 0.074 mm	0.074 mm 이하	액성한계 LL(%)	소성한계 PL(%)	소성지수 PI(%)		
SN	상 남 (수도권고속도로)	SW	GS 2.650	1.845	15.5	9.21	17.82	50.88	18.23	3.86	28.81	20.59	8.22	6	
DB	태 능 (동부고속화 도로)	SC	2.714	1.838	13.7	1.05	17.19	7.06	39.69	35.00	31.40	22.01	9.39	5	
IC	인 천 (국도 확장)	SM	2.740	1.850	13.6	0	21.75	27.38	37.50	13.37	30.51	26.97	3.54	5	
DJ	대전~옥천 (국도 확장)	SC	2.699	1.810	13.2	0.46	12.72	23.93	31.91	30.98	36.50	24.44	12.06	7	
DD	대덕 I. C (남해고속도로)	SW~ SC	2.809	1.941	11.0	5.89	35.58	21.20	28.88	8.45	20.50	10.34	10.16	3	
CJ	청주~척산 (국도 확장)	SM	2.720	1.846	13.8	3.45	9.97	6.90	67.40	12.28	23.12	21.21	1.91	3	
MJ 1	만종 1 (중앙고속도로)	SM	2.690	1.815	12.2	0.34	37.86	23.61	31.25	6.94	NP	24.24	NP	3	
MJ 2	만종 2 (중앙고속도로)	SW~ SC	2.674	1.785	15.2	2.56	29.46	35.78	24.56	7.64	28.21	20.00	8.21	6	
JS	장성~정음 (국도 확장)	SW~ SM	2.770	1.863	14.1	10.09	34.88	19.55	29.21	6.27	24.95	22.86	2.09	5	
KW	광양~순천 (국도 확장)	SC	2.658	1.701	19.1	13.82	38.17	13.25	19.61	15.15	36.44	23.20	13.24	7	
CL	남 코아체료	CL	2.700	1.780	15.2	0	2.10	9.84	34.65	53.41	24.70	12.40	12.30	3	

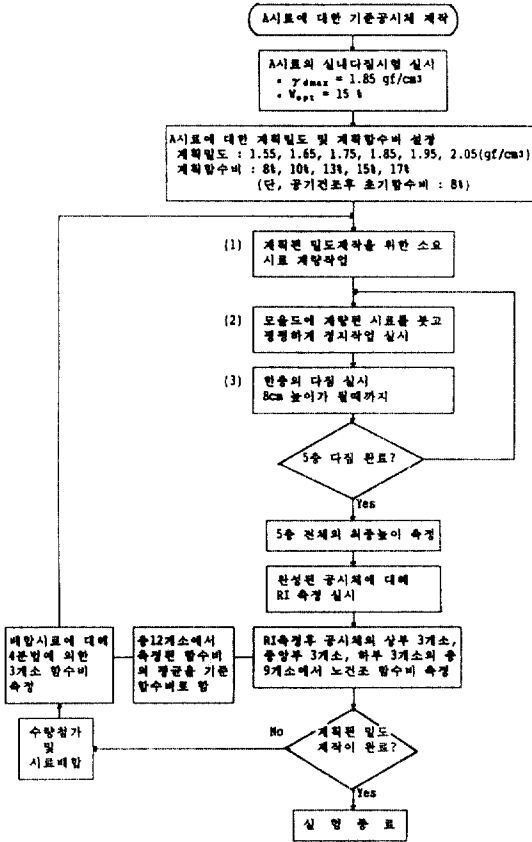


그림 13. 공시체 제작과정 흐름도.

밀도, 수분밀도(단위체적당 함수량) 건조밀도 및 함수비에 대해 검토하였으나 본 절에서는 다짐관리에 직접 이용되는 건조밀도에 대한 결과만을 소개한다. 총 172개의 모래치환법을 이용한 측정치 가운데 기준값과의 차이가 크게 나는 23개의 데이터를 제외한 149개의 데이터를 분석에 이용하였다. 기준값에 대한 모래치환법의 측정결과는 그림 14와 같고 교정전 RI측정결과와 교정후 RI측정결과는 각각 그림 15, 그림 16과 같다.

우선 교정전의 RI측정값과 모래치환법을 비교해 볼 때 RI측정값의 결정계수는 $R_2=0.946$ 으로 모래치환법의 결정계수 $R_2=0.932$ 보다 높으며 $y=x$ 에 대한 직선기울기의 선형성 역시도 모래치환법에 비하여 $y=x$ 에 더욱 근접해 있다. 뒤의 5.5절에서 상세히 설명하는 과정을 거쳐 작성한 신교정식에 의한 RI측정결과는 결정계수 $R_2=0.984$ 를 나타내고 1차 회귀식이 $y=0.98087x+1.6836 \times 10^{-2}$ 를 나타내고

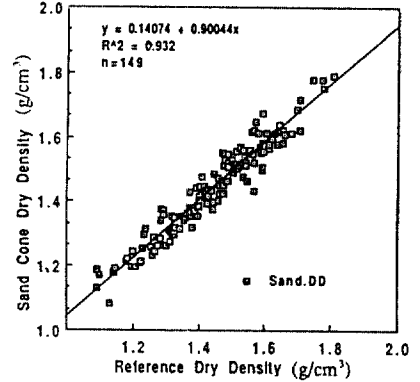


그림 14. 모래치환법에 의한 결과비교.

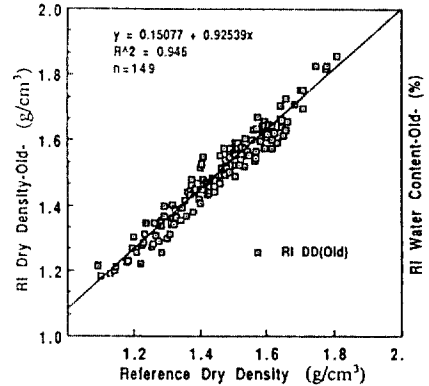


그림 15. RI측정법에 의한 결과비교(구교정식).

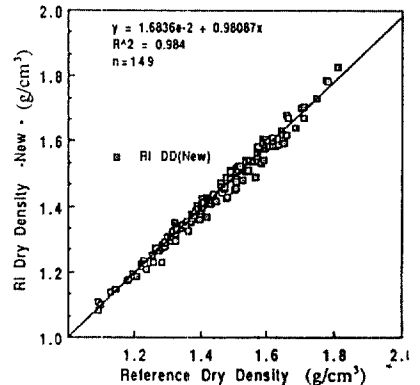


그림 16. RI측정법에 의한 결과비교(신교정식).

있어서 모래치환법이나 구교정식에 의한 RI측정결과에 비해 월등히 높은 정확도를 나타내고 있다. 따라서 RI계기내에 내장된 교정식을 수정하면 기준값에 근접하는 RI측정결과를 얻을 수 있고 신교정식의 타당성이 입증된다고 하겠다.

5.5 RI계기 교정식의 작성

본 절에서는 5.4절의 RI계기 정확성 비교연구를 통하여 나타난 신고정식의 필요성에 따라 기준공시체에 대하여 실시한 측정결과와 추가 실험결과를 토대로 하여 국내토질에 적합한 새로운 교정식을 작성하였으며 얻어진 교정식과 기존의 교정식에 의한 측정값과의 정확도 비교를 거쳐 국내토질에 적합한 교정식으로 제시하였다. RI측정원리에 기초한 교정식작성의 세부절차는 참고문헌^(2,10,12,13)에 나타나 있으나 아래에 간략히 요약한다.

새로운 밀도교정식의 계수결정에 사용한 실험데이터는 노상토 시료에 대한 161개의 데이터에 흙과 채석시료를 중량배분하여 혼합 제작한 공시체에 대해 실시한 95개의 실험데이터 및 사력댐의 코아재료로 이용된 점성토(통일분류 CL)시료 10개에 대한 실험데이터 등 총 266개의 데이터를 이용하였다. 각 측정데이터를 이용한 회귀식과 교정계수의 계산에는 비선형 계수추정법인 Gauss-Newton방법을 이용한 FORTRAN프로그램⁽¹⁴⁾을 이용하였다.

비선형 회귀분석을 행하여 얻어진 관계는 그림 17과 같고 회귀식은 식 (5.1)과 같다.

$$\ln(Rg) = E - F \cdot \rho_t$$

$$\ln(Rg) = \ln(1.75099) - 0.989065 \cdot \rho_t \quad (5.1)$$

따라서 교정계수로서
 $E = \ln(1.75099) = 0.560181$
 $F = 0.989065$ 를 얻었다.

여기에서 Rg : 밀도 측정비(상수로서 標準體에 대한 공시체의 밀도비)

ρ_t : 흙의 습윤밀도(gf/cm^3)이다.

새로운 수분밀도 교정식의 작성은 $\ln(R_m) = G + H(\rho_m + I \cdot \rho_{mi}) + J \cdot \rho_{di}$ 의 식에 기준공시체 실험에서 얻어진 149개의 $\rho_m, \rho_{mi}, \rho_{di}$ 의 실험값을 대입하여 최적의 값을 나타내는 G, H, I, J 를 교정계수로 결정하였다.

수분밀도의 교정식작성에는 149개의 데이터를 이용하였는데 이는 밀도교정식작성에 사용된 161개의 노상토시료로 제작된 표준공시체의 혼합비에 의해 계산된 함수비값(일정량의 노건조시료에 일정량의 수분을 첨가하였으므로 함수비를 계산할 수 있음)과 RI측정 후 공시체를 분해시킨 후 3개소에서 채취된 소량의 시료를 노건조시킨 후 측정된 평균함수비의

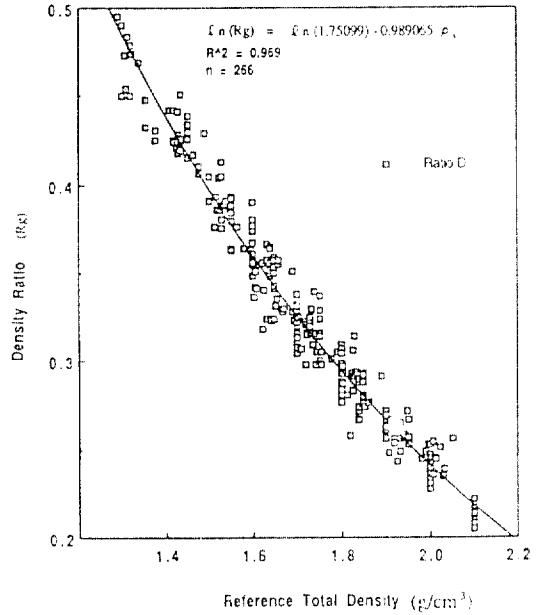


그림 17. 새로운 밀도 교정식.

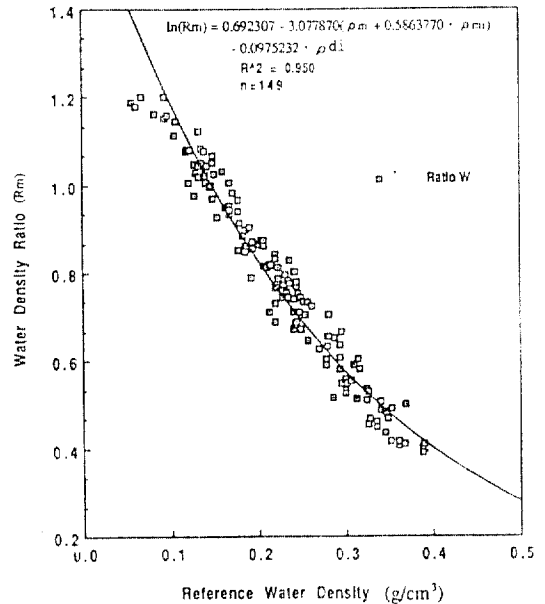


그림 18. 새로운 수분밀도 교정식.

값이 큰 차이를 나타낸 12개의 실험데이터를 제외시켰기 때문이다(참고로 밀도교정식에 이용된 표준공시체의 밀도측정값은 수분밀도의 오차발생과는 상호 관련이 전혀 없기때문에 밀도교정식의 계수결정에는 수분밀도의 교정식작성시 제외된 12개의 데

이다가 포함됨).

수분축정비와 수분밀도의 교정식에 따라 얻어진 상관곡선은 그림 18과 같고 얻어진 교정계수는

$$G=0.692307$$

$$H=-3.077870$$

$$I=0.586377$$

$J=-0.0975232$ 였으며, 따라서 교정식은 식 (5.2)와 같다.

$$\ln(R_m) = 0.692307 - 3.077870(\rho_m) + 0.5863770 \cdot \rho_{mi} - 0.0975232 \cdot \rho_{di} \dots \quad (5.2)$$

여기서 R_m : 수분축정비(상수로서 標準體에 대한 공시체의 수분밀도비)

ρ_m : 참 수분밀도값(gf/cm³)

ρ_{mi} : 강열감량시험에서 얻어진 수분밀도(gf/cm³)

ρ_{di} : 노건조에서 얻어진 흙의 건조밀도에서 ρ_m 를 뺀 값(gf/cm³)이다.

6. 결 론

6.1 연구 결론

본 연구를 통해 얻은 성과와 결론은 다음과 같다.

1) RI계기의 측정원리를 파악하고, 이의 사용에 있어서 지반기술자가 알아야 할 검증실험을 통하여 RI계기의 특성을 검증하였다.

파악된 세부적인 특성은 다음과 같다.

- 측정시간에 따른 오차 가능성 및 오차범위
- 1회 측정에 따른 측정영역 범위
- 주변 물체에 의한 영향배제 이격거리
- 강열감량 보정치에 대한 오차 가능성

2) RI계기 측정법은 기존의 모래치환법과 같은 정확도를 놓고 판단할 때 약 10배 이상의 시험성과(측정횟수)를 얻을수 있고 그 신뢰도도 약 4배 내지 40배 정도로 크다.

3) RI측정값이 시험기준값으로 비교해 볼 때 모래치환법보다 오차 발생 가능성이 작게 나타나며(5.4 절 참조), 결정계수값도 모래치환법의 경우 $R_2=0.932$ 인데 반해 RI계기 측정은 구교정식에 의할 때 $R_2=0.946$, 신교정식에 의할 때는 $R_2=0.984$ 로 나타나 모래치환법에 비하여 인적오차 발생가능성이 작

을뿐 아니라 보다 정도높은 시험법임을 증명하였다.

4) 국내의 여러 노상토 시료를 이용한 시험을 통하여 국내 토질에 적합한 신교정식을 도출하므로써 국내 RI계기 활용 기반을 마련하였다.

6.2 기대효과 및 향후 연구방향

국내의 여러 시공, 감리 또는 설계회사에서 상당한 수량의 RI계기를 구비해 놓고 있으나 실제 이를 활용치 못하고 있는 실정이다. 그러나 미국이나 일본 등 선진국에서는 시공성 향상 차원과 철저한 품질관리를 위하여 RI계기 활용에 대한 연구가 지속되고 있으며 이를 이용한 통계적 다짐관리 기법이 개발되고 RI계기를 이용한 다짐관리용 로봇까지 등장하는 등 많은 발전을 거듭하고 있다. 이러한 현실에 비추어 볼 때 본 연구는 국내에 이미 도입된 RI계기를 현장과 실험실에서 활용하는데 일조할 것으로 기대한다. 본 연구에서는 국내 10개 지점의 노상토 시료를 이용하여 국내 토질에 적합한 RI교정식을 도출하였으나 장차 더욱 많은 실험결과를 보완하여 보다 대표성이 큰 교정식이 도출되어야 할 것이다. 또한 실제 노상이나 노체의 토목재료가 흙 뿐이 아닌 자갈이나 쇄석 등도 사용되고 있으므로 이들 큰 골재가 함유된 시료에 대한 RI계기 특성이 구명되어야 할 것이며 이에 따른 보정방법도 연구되어야 할 부분이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 및 과학기술처의 토목분야 신기술 특정연구 과제의 일환으로 이 기관들의 연구비 지원하에 이루어진 과제임을 밝히며 현장시험에 도움을 주신 동아건설측에도 감사를 드리는 바이다.

참고문헌

1. 韓國科學財團, 도로건설 및 포장유지관리 시스템 개발-도로구조체를 지지하는 노상 및 노체의 성토시공 관리를 위한 시스템개발에 관한 연구(I)-, 한국건설기술연구원, 1990. 6, 160pp.
2. 과학기술처, 아스팔트 및 콘크리트 포장 구조체를 지지하는 노상 및 노체의 성토시공관리를 위한 시

- 스텝 개발, 한국건설기술연구원, 1991, 167pp.
3. 나경준, "RI계기를 이용한 성토다짐관리", 건설기술정보, 92호, 1991, pp. 15~21.
 4. Smith, P.C., Johnson, A.I., Fisher, L.M. and Womack, L.M., "The Use of Nuclear Meters in Soil Investigation: A Summary of Worldwide Research and Practice," ASTM STP No. 412, 1968.
 5. (株)필드테크, RI水分 密度計·FT-102 公團型 取り扱いマニコアル, MYT1546, 75pp, 1988.
 6. 홍성완, "토목공학분야에서의 방사성 동위원소이용", 건설기술정보, 68호, 한국건설기술연구원, 1989, pp. 5~9.
 7. 전경식, "RI를 이용한 밀도 및 함수비 측정의 원리에 대하여", 건설기술정보, 63호, 1989, pp. 19~22.
 8. 土木施工. (28卷, 10號, 1987. 8. 臨時増刊), 土木技術者のための現場計測, pp. 210~221.
 9. 石井恒久, "RIを利用した盛土の品質管理", 土木施工 29卷 1號, 1988, pp. 57~60.
 10. 日本土質工學會, 土質調査法, 第14章, 特殊な測定A, ラジオアイソトープ利用による 土質調査, 1976, pp. 591~607.
 11. 한국도로공사, 건설공사 품질시험 편람, 1989. 9, 919pp..
 12. 日本道路公團試驗所, RI計器 で土の密度 含水量をはかるしくみ(測定原理と 校正 曲線の 作成), 1984, 195pp..
 13. (財團法人) 高速道路技術 センター, ラジオアイソトープによる盛土管理手法の 研究(日本道路公團委託), 1984, 142pp.
 14. Kvestner J. L. and Joe H. Mize, Optimization Techniques with Fortran, McGraw-Hill Book Co., 1973, pp. 218~239.

(接受: 1993. 9. 22)